



解説

最近の磁気計測事情

榊原 悟, 栗原 研一¹⁾
(核融合科学研究所, ¹⁾日本原子力研究所)

Recent Progress in Magnetic Measurement

SAKAKIBARA Satoru and KURIHARA Kenichi¹⁾

National Institute For Fusion Science, Toki 509-5292, Japan

¹⁾Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-0193, Japan

(Received 12 March 2004)

This article presents recent progress in magnetic measurements of magnetic confinement systems. "Signal drift" in the integrator for magnetic measurements is one of the major problems for plasma control and the estimation of equilibrium parameters in long-pulse operation. In addition, the durability of sensors such as a magnetic probe, a flux loop, etc., under fusion neutron irradiation environments is also important. The present status of the developments of a long-pulse integrator and a new magnetic sensor are reported.

Keywords:

magnetic measurements, long-time integrator, magnetic probe, drift, equilibrium control

1. はじめに

磁場閉じ込め装置における磁気計測は、プラズマ制御や平衡物理量評価に対する重要なツールとして認識されている方が多いだろう。では計測システム自体についてはどのような印象をお持ちだろうか。単純で比較的安価な計測？開発要素のあまりない技術的に確立した計測？小さな労力で有益な情報が得られる計測？このようなコメントに対して計測担当者は「半分は本当で半分は誤りである」と主張したくなるに違いない。核融合プラズマ研究は、実験室レベルのものから超高温プラズマの長時間保持を実現する時代へと変わりつつあり、これに伴って計測機器側も信頼性あるデータを取得するための工学的な開発が必要となってきた。本稿では、上述の誤解を解き、現在の磁気計測の問題点および開発の重要性について正しく認識していただくことを意図している。はじめに、磁気計測の歴史および位置づけについて簡単に触れておく。

磁場閉じ込め装置におけるピックアップコイルやループを用いた磁気計測は、プラズマの平衡量の同定および制御、MHD現象の理解といった面で核融合プラズマ研究の進展に大きく貢献してきた。計測の歴史はすなわち核融合プラズマ研究の歴史と言っても過言ではなく、古くは黎明期のトカマク装置、そして現在では国際熱核融合実験炉(ITER)への適用が計画されており、プラズマ内部の分布、擾乱計測が大きく発展してきた現在においてもその重要な位置づけは変わらない。本計測が長きに亘って利用され続けている理由としては、プラズマ電流や反磁性エネルギーなどの平衡物理量を比較的容易に評価できる点、プラズマ

authors' e-mail: sakakis@lhd.nifs.ac.jp, kurihark@naka.jaeri.go.jp

の実時間制御において技術的に確立している点、計測機器の信頼性(壊れにくい、容易なメンテナンス等)、そして何よりも他計測と比べて単純で安価である点にあると言える。

しかしながら、近年の放電の長時間化における信号処理の問題、またそれに伴う熱的な計測環境の過酷化など、計測の高精度化、機器の信頼性という観点から今もなお開発が続けられている。特に長時間積分器の開発研究は、常時運転を想定される定常炉において非常に重要となる。本稿では、磁気計測機器の具体的な問題点についてまず記し、長時間積分器および磁気センサーの開発の現状について述べる。最後に計測システム開発の今後の展開について記す。

2. 簡単だけど難しい計測？

磁場閉じ込め装置における磁気計測は、大別して

- (1)物理量(プラズマ電流、周回電圧、反磁性エネルギーなど)の直接計測
- (2)平衡磁場に影響を与える擾乱の時間、空間的構造の理解
- (3)プラズマを保持する閉じ込め磁場構造の同定および制御が主な目的となる。ここでは「計測の難しさ」として主に計測機器自体の工学的な問題について述べるが、その前に物理量評価に関する問題点および現在の研究の方向性について簡単に触れておこう。磁気計測によって得られる信号には、本来の計測目的であるプラズマ内部電流による成分のほかに、計測環境周囲の構造物に誘起される渦電流による成分が含まれるため、表皮効果を考慮した渦電流成分の

定量的評価が(1)をはじめとして磁気計測における共通の課題となる。(2)については空間的に有限波数を持つ磁場擾乱構造をトロイダル、ポロイダル方向に設置した磁気プローブ(ミルノフコイル)アレイを用いて評価するものであり、ECEや軟X線ダイオードなどによるプラズマ内部計測と組み合わせることでMHD安定性に対する有益な情報を提供することができる。計測自体はコイル以外に増幅器とフィルタのみで十分可能であるが、安定性制御の観点からはモード解析の高速化および振動コイルを用いたフィードバック制御システムの構築等が重要となり、現在は主に新古典ティアリングモード、抵抗性壁モード等の制御の観点から開発が進められている[1, 2]。(3)においては、磁気計測はプラズマ境界の同定をはじめとして詳細なMHD平衡の再構築に対して有効に利用され、高い時間応答性という利点を生かして平衡を実時間で監視し制御する上で重要な役割を演じており、主にトカマクをはじめとするプラズマ内部に電流を流すことにより平衡配位を得る装置を中心に研究が進められている。最近の研究としては、ニューラルネットワークなどを用いた迅速な平衡配位の再構築、およびディスラプションなどによる不安定性に起因した平衡破壊の回避[3]、MSEによる電流分布計測と組み合わせた実時間平衡制御[4]などが精力的に進められている。一方、外部コイルにより閉じ込め磁場が与えられるヘリカル/ステラレータ系では、閉じ込め磁場が外部から与えられるため平衡監視、制御はトカマクほど重要とはならないが、平衡電流(反磁性電流とPS電流)計測を通じてプラズマ圧力や分布形状などの平衡量を導出する試みがなされている[5, 6]。本質的な問題点として、外部磁場計測からプラズマ内部電流構造を評価することは逆問題を解くことと等価であることから、磁気計測のみから平衡を再構築する際には平衡量に対して何らかの仮定を設ける必要があり、特に時間応答性の観点から他計測の情報が得られにくい実時間制御においては、その精度向上のために研究が進められている[7]。

次に本稿の主題である磁気計測の工学的問題に移る。一般に磁気計測と言えば、計測する環境により様々な計測法があり、一般的な環境ではホール素子等の半導体素子を用いた計測が広く知られている。半導体素子による計測は、磁場強度を直接計測することができるという大きな利点があるが、核融合プラズマを想定した場合、耐熱性、耐放射性の点で問題があるため、現在広く利用されているコイルやループを用いた計測の代替機器として使用するには克服しなければならない課題が多く残されている。コイル、ループを用いた磁気計測は、磁場の変動によってセンサーに発生する誘導電圧を積分することにより磁場が得られるというものであるが、本計測の利点としては、計測対象に応じて任意に仕様(出力、周波数応答)を決定できること、センサーとして真空特性、耐熱性、耐放射性に優れた材料を任意に選択できること、また、計測対象によっては反磁性計測のように磁束量として評価した方が有利となる場合があることなどが上げられる。また、これまでのほとんどすべてのパルス放電の核融合装置で使用されていることから、制御用センサーとしての使用実績が高い。具体的な計

測手法は、プラズマ計測関係の教科書によると、コイルやループの両端に抵抗 R とコンデンサー C による積分回路を設置し、計測対象の磁場に対して十分な S/N が得られるようにコイルの巻き数 N 、鎖交面積 S の積で決まる出力係数(NS)および積分定数(RC)を決定すればよいと記されている[8]。これは二次回路(プラズマ)を持つLRC回路と等価であり、コンデンサーに蓄積された総電荷量が“積分信号”となる。コイルの出力係数 NS および積分定数 RC ともに制約があるため、高い S/N を得るためにオペアンプなどの増幅回路が用いられる場合が多い。実際の計測環境では R や C が温度依存性を持ち、増幅に用いるオペアンプはオフセットを持つため、積分された信号(磁場)は実際の磁場からずれていく(ドリフトと呼ぶ)。このずれは時間の経過とともに大きくなる。短時間の計測であれば、計測時にドリフトの線形性が保たれている場合には計測信号の修正が可能であるが、長時間に及ぶ場合にはその線形性を維持することは難しく、仮に線形性が保たれたとしてもデジタル化してデータ収集する場合にはダイナミックレンジの制約があり、ドリフトによる信号の飽和が問題となる。ドリフト低減のために積分器の温度管理(ヒータやペルチェ素子など)が行われているが、本質的にドリフトを回避することは困難である。

このように、磁場変動信号を積分することにより磁場を計測する方式は、簡単、単純ではあるものの、信号を積分する際になんらかの“工夫”が必要であることがわかりただけたであろう。磁場閉じ込め装置の放電時間は研究の進展とともに伸びており、ミリ秒オーダーから秒、分、そして時間オーダーへと変わりつつある。定常的な核融合炉の運転を見据えるならば、この課題に対して研究開発を進めていく必要がある。

3. 時間積分のアイデア —最近の進歩と新しい課題—

磁場変動信号の時間積分により磁場を計測する方式は、現象に対する追従性も含めた精度の点で優れていることがこれまでの実績から判明している。しかし、長時間での高精度の確保については、その信号処理に不可欠である積分器がドリフトするという特性を持っているため長時間に亘る高精度計測は困難とされてきている。

このようにもし完全な定常運転を考えた場合には、絶対磁場計測が必須であり、同時にプラズマの速い変化を高精度で計測するために、磁場変動信号の時間積分方式との併用が不可欠となる。絶対磁場センサーの耐放射線性や保守性を考えれば、プラズマ近くに変動磁場センサー、遠くに絶対磁場センサーを設置するという構成が考えられる。現時点で核融合実験炉として想定しているのはITERであり、そこでは定常ではなく約3,000秒程度の長パルス運転である。その程度の運転時間を考えると、時間積分方式のドリフト誤差を最小限にできれば、絶対磁場センサーを用いた計測方式は必ずしも必要ではなくなる。この意味で約3,000秒程度の長パルス運転に適用可能な精度を持つ時間積分器の開発は、ITERの計装系をより簡素化させ、ひい

ては製作費を軽減させる効果が期待できる。

3.1 電磁気センサーの出力電圧の観察[9, 10]

JT-60 実験放電での電磁気センサーはどのような電圧を出力しているのだろうか。デジタルオシロスコープを用いて JT-60 の電磁気センサーからの実波形を観察した。使用したセンサーとして、真空容器内側に設置されたプラズマ電流が作る磁場に対して接線方向の磁場を計測する磁気プローブを選んだ。Fig. 1 にいくつかの生の電圧波形を示す。プラズマ放電 2 秒前のポロイダル磁場コイルの励磁時点から計測を開始している。(a)は通常の放電の電圧波形であり、 ± 1 V 前後の高い周波数 (kHz オーダ) の振動が放電最初から最後まで続いている。特に注意が必要であるのは、この放電の間プラズマ電流が変化しているにもかかわらず、振幅が殆ど変化していない点である。プラズマがマクロ的に移動することで発生する磁場変動であれば、プラズマ電流に比例した振幅にならないといけないがそうではないので、ここではプラズマの移動が主要因でないことを示している。この振動は、サイリスタ電源が発生するリップルである可能性が高い。

さて、(a)以外の波形は、(a)と同日に行った色々な放電での出力電圧である。特殊な放電でなくても、プラズマ着火、消滅、加熱中などに積分誤差を発生させるようなパルスの信号が見られることが確認された。(b)は通常の放電であるが、プラズマ放電の着火・消滅時には、プラズマの具合と関係すると思われるが、パルスの着火時 10–20

V, 消滅時 -20 V 以上の電圧が観測された。またプラズマ内部の不安定性発生時にも同様のパルス信号が発生する。(c)は中性粒子入射加熱装置 NBI の入射によって、プラズマの MHD 揺動現象が断続的に発生しているようで、パルスの 50 V 前後の電圧変動が加熱期間中断続的に多数発生している様子が観測されている。(d)はディスラプション時の波形である。オシロスコープのレンジ設定の関係で 200 V まで捉えられているが、通常時の 200 倍以上にあたる 200 V 以上もの高い電圧となっているという驚くべき事実がわかった。サンプル周期が 100 ms であることから、時間幅も 100 ms 程度はある。マイナーディスラプション等が発生した場合等にもこの異常電圧が発生する。

このように磁気計測には、ドリフト等の時間積分に関する問題に加えて、不安定性等がもたらす過電圧信号が大きな計測誤差を発生させるという問題点がある。次節では、実施あるいは提案されている時間積分方式とその問題点について取り上げ、3.3 節で過電圧信号による積分誤差を回避する手法について述べる。

3.2 時間積分方式の分類と問題

センサーであるソレノイドコイル等のループ導体線の両端に発生した電圧信号を時間積分する方法として、これまで実施あるいは提案されている方法は、時間積分とデジタル化の順序や処理の違いによって主なものとして 3 種類である。即ち、(a)アナログ積分–アナログ・デジタル変換方式、(b)高速アナログ・デジタル変換–数値積分方式、(c)電

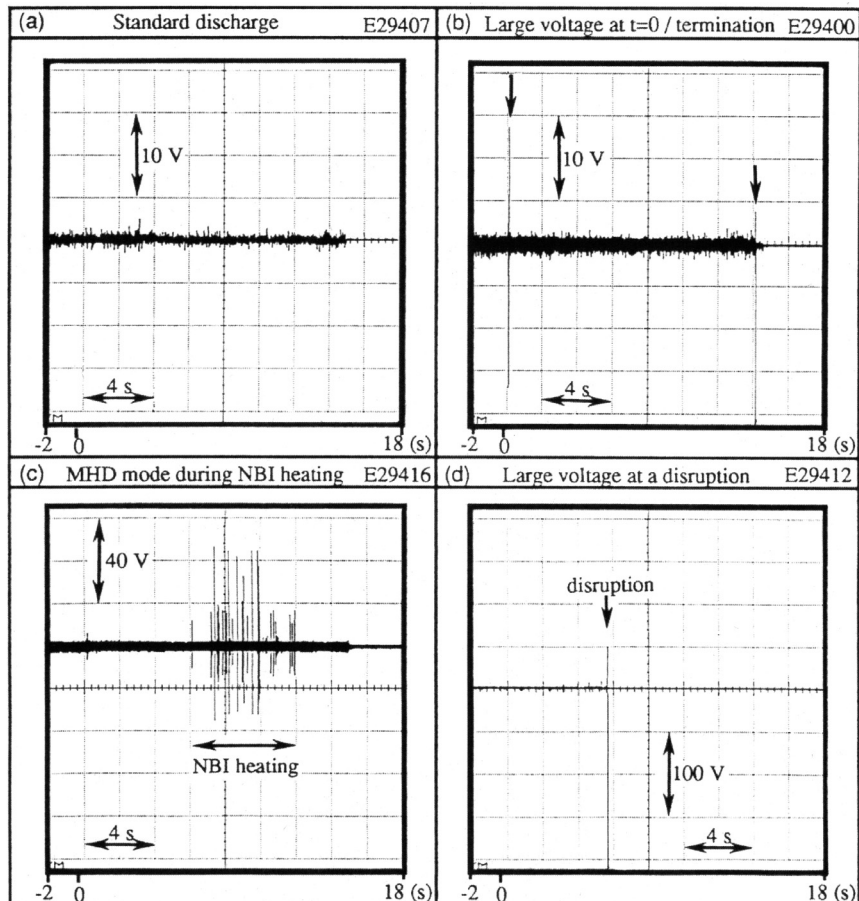


Fig. 1 Raw voltage signals from a B_θ -magnetic probe equipped in JT-60.

圧・周波数変換－昇降計数方式，である。

(a) アナログ積分－アナログ・デジタル(AD)変換方式 [11, 12]

発生電圧を用いてコンデンサーに電荷を蓄積する方法であり，積分結果はコンデンサーの総電荷量(両端の電圧)となって計測される。この積分結果の電圧を AD 変換すればデジタル信号が取り出せることは言うまでもない。この方法は積分結果もまずアナログ信号で出力されることから，デジタル計算機が発達する以前アナログ回路だけでロジックを構成する頃から使用されている。注意点は，積分結果の動作範囲(ダイナミックレンジ)がコンデンサーの容量で規定されてしまう点である。この対策のため，積分結果の絶対値に応じて十分入力電圧を下げておくと対ドリフトや対回路ノイズとの関係で誤差が相対的に大きくなり，一方容量の方を上げると積分量の小さい場合の誤差は大きくなってしてしまうので，その中間で適切な容量を設定することとなる。さらに，積分回路に使用するオペアンプの特性から，積分器として動作するための，入力電圧の周波数範囲が規定されてしまうので，回路内定数を使用する対象に応じて決定しなければならない。

(b) 高速アナログ・デジタル変換－数値積分 [13]

高速 AD 変換器を用いて電圧信号(生信号)をその変化の時定数に比べ十分短いサンプル周期でデジタル化する。その後高速デジタル処理装置において適切な内挿関数を用いてサンプル値間の信号補間を行って数値的に時間積分を実施する。本手法の問題点は，① AD 変換器のオフセット誤差が蓄積する結果として信号ドリフトを生じさせてしまう点。さらに② AD 変換器のサンプル周期より速く変化する現象の積分ができないため，トカマクプラズマのような極めて高速の変動に対し十分短い AD 変換周期を設定せざるを得ない，などがあげられる。そのような AD 変換器が製作可能かどうか，多数のチャンネルをこのような方法で実現しようとした時のコストの問題などが直ちに課題として想起される。またドリフト対策では，2 台の AD 変換器を並列動作させ，1 台は計測に残りの 1 台はドリフト量の計測に使用し，2 台のドリフトが同じであることを仮定して補正を加える方法の提案が報告されている。

(c) 電圧・周波数変換－昇降計数方式 [9, 10]

本方法は，まず(a)と同様に入力電圧に比例した電荷を，微小コンデンサーでいったんアナログ積分するが，コンデンサー容量が微小である点が大きな違いである。概念を大雑把に言えば，このコンデンサーに蓄積された電荷を一定量汲み出し，その汲みだし回数を数えて積分量を算出する方式である。アナログ積分の長所である過渡信号の高精度積分を生かしながら，短時間の間にデジタル化することでダイナミックレンジを大きく確保することができる。入力電圧の増減に応じて回数が増え，結果的に周波数が増減する機構，即ち電圧周波数変換(VF 変換)の部分が鍵となる技術である。

具体的には，入力電圧(例えば $-/+10\text{ V}$)の時間積分値を，それとオフセットリニアの関係にある周波数(例えば $0.25\text{--}1.25\text{ MHz}$)の矩形波に変換し出力する VF 変換部分

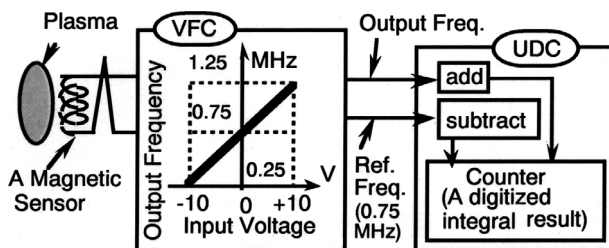


Fig. 2 Scheme of the signal integration with a VF converter.

と，この出力と入力信号 0 V 時の基準周波数(上の周波数範囲の場合， 0.75 MHz)とのパルス個数の差を，昇降計数して積算する部分とを組み合わせる信号積分を行う方式である (Fig. 2 参照)。

より具体的な VF 変換の仕方は，この出力パルス個数をアップカウント(加算)し，基準周波数パルスをダウンカウント(減算)することで正味の積分値のデジタル値がカウンター内のレジスター中に得られる。基準周波数を測りたい現象の特性周波数に比べ高く設定することで良好な応答特性が確保でき，またレジスターの語長を増加させるだけでダイナミックレンジを大きく設定すること(24 bit 長で約 100 万カウント，32 bit 長で約 10 億カウント)ができる。しかし，アナログ回路内の基準電圧発生器等から発生する長周期の電圧変動やセンサーや接地系から回り込むノイズ等が原因で積分結果にドリフトが生じるという問題点があるので，それらの誤差が無視し得る程度のダイナミックレンジを確保することになる。

このように見た時，(a)アナログ積分方式では長時間特性と広いダイナミックレンジに，(b)高速アナログ－デジタル変換方式では応答特性に，それぞれ問題点を有しており，(a)方式の持つ応答特性の利点と(b)方式の広いダイナミックレンジの利点を兼ね備えた(c)方式がこの中では最良のように見える。

大型トカマク実験が本格化した 1980 年代半ばから，JET を始め世界的には(a)方式が多く適用されてきた。一方 JT-60 では当初より完全デジタル制御系を採用した方針の中で，(c)方式が採用された。その後の実験の進展に伴う制御の高度化を進める一環として，電磁気計測精度の向上と放電長時間化対応を目的に，3 方式に共通の問題であるドリフトや誤差の原因究明の検討が進められた。その過程で，3.1 節で述べたように，プラズマ周辺磁場の変動特性が明らかになり，特に不安定時の対応が重要であることが判明している。

3.3 積分器の誤差の原因と「飛び」の対策 [9, 10, 14]

積分誤差化の直接要因は，これまでの VF 方式(3.2 章の(c))の開発経験から，① VF 変換時の直線性誤差，② PLL (phase locked loop 現象：ある特定の周波数で一種の共振回路となるために周波数の変化しにくくなる現象)に起因する 0 V 入力時の不感帯，③ドリフト (Fig. 3)，④信号過電圧による積分信号の「飛び」(Fig. 4)，の 4 種であることが判明している。最初の 3 点については，これまでの開発の結果，1,000 秒以上の放電に使用できる見通しが得られている。特にドリフトについては，Fig. 3 に示すように大幅に抑

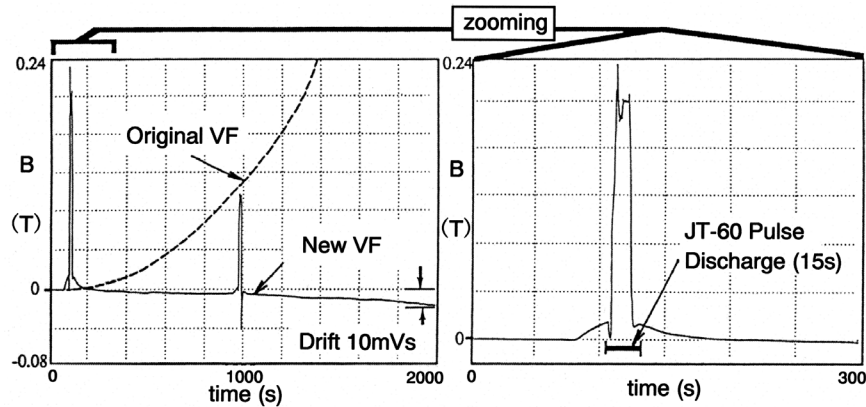
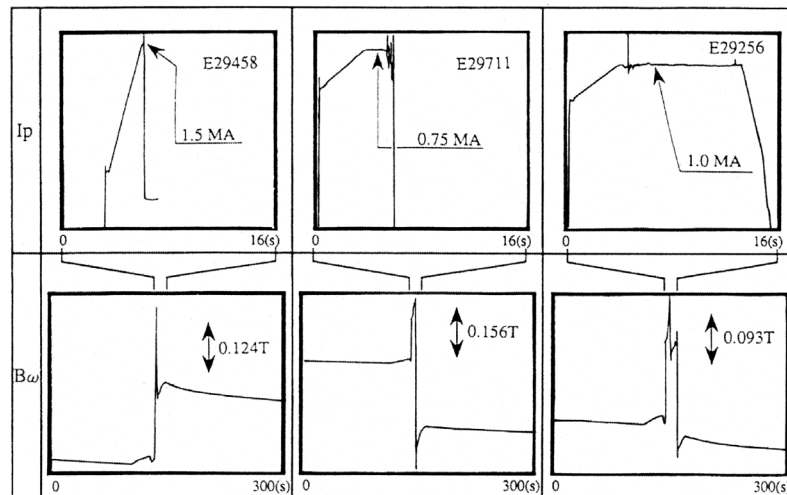


Fig. 3 Test results of the newly developed VF converter applied to JT-60 plasma pulse discharge.

Fig. 4 Jump of the $B\omega$ -signal base line at disruptive instabilities.

制することに成功している。

大きな積分誤差を生む原因として残されたものは、ディスラプション時に代表されるプラズマの内部不安定性に起因する異常な磁場変動がセンサーに誘起する高電圧であることが明確となっている。実際に高電圧の発生が確認されたので、対策としては入力電圧を降下させるアッテネータ（信号減衰器）を入力前段へ挿入することである。

しかし、通常数 V 以下の信号を例えば 1/100 に減少させて常時計測することは極めて不合理である。しかもアッテネータは抵抗分圧であり、回路内の微小な誤差電圧が分圧比の逆数倍されることや、温度変化による抵抗値変動を考えると、積分誤差はさらに広がることが予想される。JT-60 での観測の結果、入力電圧の低下により VF 変換器内での S/N 比が下がる場合、20 秒放電中はほぼ直線的なドリフトが生じている。したがって、複数のダイナミックレンジを持った積分器の使用が必要であることがわかる。そこで、ごく短時間の電圧異常時にのみアッテネータ通過後の信号を使用し、そのパルスの変動時を除く残りの殆どの時間ではアッテネータを経由しない信号を使用する、という対策が比較的素直な発想であろう。

そこで、センサー 1 個あたり 2 - 3 種類のゲインまたはアッテネータを持った複数台の積分器を並列動作させるこ

とを考える。複数台の昇降計数を行うアップダウンカウンタ (UDC) は、1 台の高速デジタル信号処理装置 (DSP) により、積分結果データの読み出しが可能な構造とする。DSP は、アッテネータの装着した系の UDC の時間変化から発生電圧を計算し、それが別の系の VF 変換器を飽和させている場合には、その時間幅のデータは、アッテネータの装着した系の UDC を使用する。UDC のカウンタの更新周期は例えば 0.1 ms 程度を考えておけば、DSP は 0.1 ms 周期で 3UDC を読み、データに補正をかけた最終的な積分値を、さらなる上位の制御用計算機に伝送する。もちろん、飽和した回路は保護用に挿入されたツェナー素子で閉回路ができるのでダイナミックに回路が変化することを考慮したアルゴリズムを開発し DSP に組み込むことになる。このようなシステムの概念構成図を Fig.5 に示す。現在、JT-60 において試験が行われており、初期結果ではあるが、予定どおり飛び現象が回避されている [14]。

3.4 定常運転への応用シナリオ

超長時間運転 (3,000 秒を超える運転) 時あるいは定常運転時に積分方式はどれだけ対応できるであろうか。この質問に答えるだけのデータを著者らは今持っていない。しかし、基準電圧発生器のドリフトがすべてを決めているという粗っぽい仮定を行い、さらに積分結果のドリフト速度

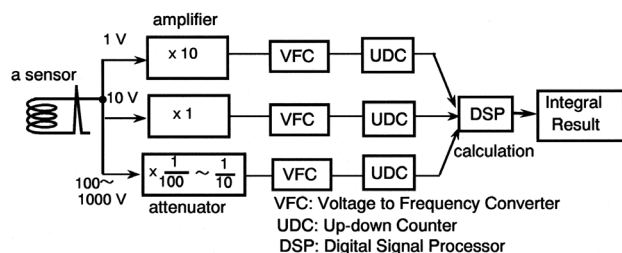


Fig. 5 System configuration of an intelligent integrator to avoid the jump of the signal base line.

が 0.02 mVs/s 即ち 0.02 mV 相当のオフセット電圧が基準電圧発生器内に発生するまでを利用可能時間とした場合, JT-60のノイズ環境下で2–3時間程度は不可能ではないように思われる。

将来のトカマクにおいて計画されている超伝導コイルの場合, ノイズ環境は厳しくなるのか楽になるのかは全く不明である。しかし電源の電圧変動によって発生する超伝導コイルの交流損失を最小限にしなければならない, という要請が満たされたとすると, 電圧変動は減ることになることも考えられる。もし, ノイズ環境が楽になれば, 使用可能時間はさらに延ばせるかもしれない。

定常トカマク型核融合炉が実現に至っても, ピックアップコイルなどの電磁気計測センサーは高速な過渡現象把握のためには不可欠であり, 同時に時間積分方式も必要であることは明確である。しかし, 原理的に積分時のドリフトは回避不可能であるので, 単独使用は有り得ない。この時絶対磁場計測とのハイブリッド使用となるが, 絶対磁場計測センサーは耐放射線性の点で課題が多く, 炉心から遠く離して設置されることになる。この場合, その離れた定常磁場センサーから炉心近くの磁気プローブ設置箇所での磁場を同定するアルゴリズムが必要となり, 既に初期の結果が報告されている[15, 16]。適切な種類と数のセンサーがあれば, プラズマ外部磁場の可同定性は保証されている[17]。しかし, プラズマ以外に計測不能な渦電流が存在している場合などは, 可同定かどうかは議論を要する。この点は解決が必要な数理解析的な課題として残されている。

4. たかがコイル, されどコイル?

次に磁気センサーに目を向けてみよう。コイルの仕様(巻き数, 鎖交面積)は, 対象とする磁場強度および周波数帯域によって決定され, 構造, 材質は設置空間および環境(熱, 真空, 機械特性等)に応じて選択される。コイルの周波数特性は自己インダクタンスおよび静電容量により決定され, 低い周波数帯域で十分高い出力を得るには巻き数, 鎖交面積を高くする必要があるが, 自己インダクタンスが高くなって周波数特性は悪くなる。逆に高い周波数帯域を計測対象とするのであれば(例えば揺動計測), 低周波での応答性を犠牲にし, なるべくインダクタンスを低く抑える必要がある。一般的には計測対象に応じたコイル設計が必要となり, 大抵の装置には平衡制御用($\sim 10 \text{ kHz}$), 揺動計測用($50 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$)の2種類のプローブが真空容器内部に設置されている。

計測環境がそれほど厳しくない往年の中小型装置では, 例えばエナメル線をテフロンなどのボビンに巻き, ガラス管やステンレスチューブに収めて設置し, ポート部までの信号線にはセミリジッドケーブル(テフロンを絶縁体とした銅の同軸ケーブル)がよく利用されていた。これならば安価で特殊な技術も必要とせず, 研究者自らが製作することも可能である。しかしながら, 実験装置の大型化および加熱入力増大に伴い, 計測環境の厳しさに加えて(装置運転の観点から)機器の信頼性が非常に重要となり, プラズマ維持に影響を与えない高い安全マージンを持つ仕様が要求されている。まさに「たかがコイル, されどコイル」の時代に移りつつあると言えよう。

一例としてFig. 6に日本原子力研究所のJT-60Uに設置されている磁気プローブの構造を示す[18]。本プローブはNプローブと呼ばれ, 主に平衡制御用として利用されている。JT-60Uは真空容器のベアリングが 350°C で行われるため, これに十分耐えうるようにプローブ本体はインコネルの二重シースで保護されている。コイル線はセラミックコーティングされた白金線を使用し, セラミックのコイルボビンに巻かれている。引き出しケーブルはMI (Mineral Insulated) ツイストケーブルが用いられている。MIケーブルは中心にコンスタンタンのツイスト線, シース部がインコネルでできており, 絶縁材として酸化マグネシウム(MgO)の粉末が充填されている。本ケーブルは原子炉で熱電対として利用されており, 熱的にも放射線に対しても信頼性が高く, 他のケーブルと比較して曲げ特性にも優れている。コイル信号はMIケーブルを用いて真空ポートまで引き出され, MIケーブルの破損による真空リークを想定し差動排気が行われている。

磁気プローブは周辺磁場および擾乱の構造を評価するために, プラズマのポロイダル・トロイダル断面上にアレイとして設置することが多い。詳細な構造評価を行うにはできるだけ多くのプローブを設置する必要がある一方, 実際の設置においてはその空間的制限が仕様を決定する大きな制約となるため, プローブは高いセンシティビティを維持しながらコンパクトであることが望ましい。また, TAEなどの高周波磁場を計測するためにはできるだけプラズマに近い(構造物から離れた)場所に設置する必要がある, より高い耐熱性が要求される。このような観点から開発され

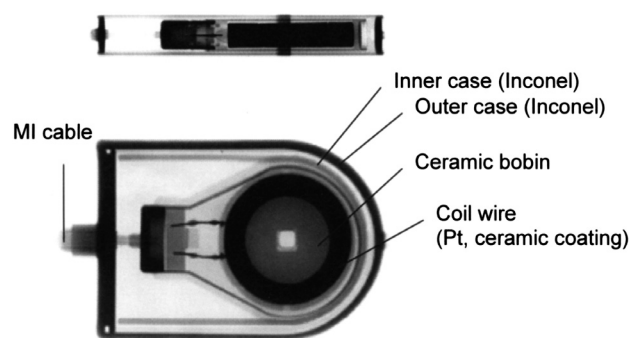


Fig. 6 X-ray pictures of the magnetic probes for plasma control in JT-60.

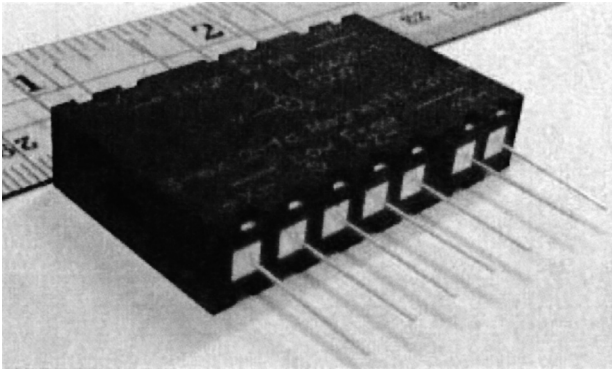


Fig. 7 Magnetic probe using thick-film technology [19].

たのが Fig. 7 に示す三軸磁気プローブ (AT プローブ) であり、現在核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) で使用されている [19]。本プローブはプリンストンプラズマ物理研究所の Takahashi 博士が考案し、核融合研との共同研究の下で開発したものである。構造は、アルミナ含有率 95% 以上のセラミック板上に、Fig. 8 に示すようにタンゲステンをコイルパターン状 (三方向相当) にメタライズし、それを 40 枚積層し、焼成したものである。本プローブの特長としては、

- (1) 一つのプローブ内部に 6 つのコイル (低周波、高周波用の三軸コイル) および静電シールドを有し、コイル中心は同一であること (コイル線を用いた構造では不可能)
- (2) プローブ単体の耐熱温度は 900℃ 以上
- (3) コンパクト ($240 \times 400 \times 95 \text{ mm}^3$) で高いコイル出力 (NS $\sim 300 \text{ cm}^2$)

などがあげられる。周波数応答は現在の仕様で 300 kHz である。本プローブは一度の製作過程において複数個同時に製作可能であることから、多数製作することによって単価を抑えることができる。欠点としては、三軸構造を実現するために複雑なコイルパターンを有することから仕様変更が容易ではないこと (複数のプローブを接続することは可能)、プローブと引き出しケーブルを接続するために別途ケーシングが必要となることであり、ケーブル接続部もセラミック内部にするなど今後改良を重ねていく必要がある。現在は JT-60U において試験的にプローブを設置し、ディスラプション時における機械特性の健全性、耐放射性について調べている [20]。

最後に磁気センサーの耐放射線性について触れておく。セラミック系材料は MI ケーブル内の充填材やコイルボビンとして多用されているが、セラミックスが放射線に曝された場合に問題となるのが、照射誘起伝導 (RIC)、照射誘起絶縁劣化 (RIED) そして照射誘起起電力 (RIEMF) と呼ばれる現象である [21]。RIC は照射中に電気伝導度が増加する現象であり、絶縁性能を劣化させる恐れがある。RIED は照射によって永久的に電気伝導度が増加するもので、高電圧下にあるセラミックスに連続照射すると起きるものである。いずれの場合も ITER の放射線環境下では問題とならないことが R&D を通じて確認されている [22]。RIEMF

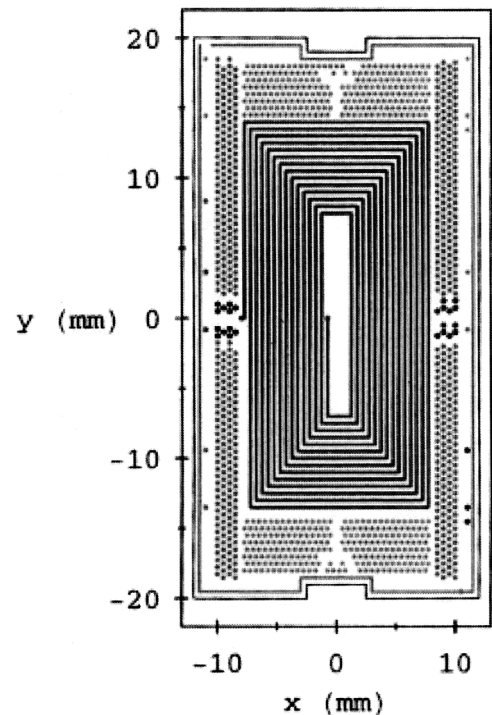


Fig. 8 A metallic ink pattern of a typical plate $\sim 22 \text{ nd}$ sheet out of 40 counting from the bottom [19].

については、磁気プローブの照射試験において自己インダクタンスの変化は見られなかったものの、心線と外部導体間に 5 $\sim 6 \text{ V}$ の電圧の発生が生じ、本現象が測定誤差の原因となる可能性があるとして報告されている [23]。

5. 核融合炉計測器としての今後の展開

本稿で取り上げた開発研究は、コイルやピックアップコイルを用いた伝統的な磁気計測システムの改善を目的としたものであるが、一方で、ドリフトの問題を排した定常磁場計測のアイデアがいくつか提案されている。九州大学応用力学研究所にある超伝導トカマク TRIAM-1M では、ホール素子を用いた位置制御が行われている [24]。ホール素子は定常磁場計測に有効であるが、高放射線環境化での劣化や機械振動を受けた場合の誤差等が課題であり、従来の計測システムと組み合わせて利用する等の提案がなされている。ITER 計画では、従来の磁気計測手法に加えて、定常計測用として機械式磁気プローブ [25] や回転方式磁気プローブ [26] の試作開発がなされている。機械式磁気プローブは、0.1 Hz より高い周波数については従来方式のセンサーを用い、低い周波数帯については磁場中に既知の電流を流した時の機械的な力を測定する方式を用いて、両者の信号を合成回路で重ね合わせることで磁場を評価するものであり、R&D の結果良好な特性が得られている。回転式磁気プローブは、圧縮空気供給によりプローブを回転させ磁場を計測するもので、トランス結合回転コイル方式での試験では 170 時間以上の連続運転が実施されている。また、磁気計測を用いず閉じ込め磁場コイルを計測器として利用した所謂センサーレス計測 [27] や、光ファイバーを用いた磁場計測についても開発が続けられている [28]。

本稿では、最近の磁気計測における工学的な開発課題に焦点を当て、開発研究の方向性について述べてきた。残念ながら今現在、定常磁場を精度良く計測する有効な手段は見つかっていない。「磁場を測る」ことが一見簡単そうに見えて実は非常に難しいということが本解説を通じて少しでもご理解いただけたら幸いである。磁場計測がプラズマ制御の観点で重要な位置づけである限り、磁場計測に関する開発研究は今後も継続されていくだろう。

参考文献

- [1] D.H. Edgell *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **73** 1761 (2002).
- [2] E.J. Strait *et al.*, Nucl. Fusion **43**, 430 (2003).
- [3] G. Pautasso *et al.*, J. Nucl. Mater. **290-293**, 1045 (2001).
- [4] Y. Kawano *et al.*, Proc. 30th EPS Conference on Control Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA Vol.27A, O-3.5C.
- [5] S. Morimoto *et al.*, Nucl. Fusion **28**, 1491 (1988).
- [6] S. Sakakibara *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES 1, 1430 (1997).
- [7] 山崎耕造：「講座 核融合装置におけるプラズマ平衡制御」プラズマ・核融合学会誌 **75**, 1375-1395 (1999), **76**, 65-82 (2000), **76**, 247-266 (2000), **76**, 384-394 (2000) の 4 回連載.
- [8] 例えば、プラズマ・核融合学会編「プラズマ診断の基礎」名古屋大学出版会 (1990) やプラズマ・核融合学会編「プラズマの生成と診断 - 応用への道 -」コロナ社 (2004).
- [9] 栗原研一, 川俣陽一：「高精度長時間デジタル積分器の開発」日本原子力研究所報告 JAERI-Research 97-072 (1997).
- [10] K. Kurihara and Y. Kawamata, Proceedings of 17th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (1997, San Diego, USA) p.799.
- [11] ITER-EDA "Technical Basis for the ITER Interim Design Report, Cost Review and Safety Analysis," ITER EDA Documentation Series No.7, IAEA (1996).
- [12] R.D. Woolley, Proceedings of 16th Symposium on Fusion Engineering (1995, Illinois) p.1530.
- [13] J.D. Broesch, E.J. Strait *et al.*, Proceedings of 16th Symposium on Fusion Engineering (1995, Illinois) p.365.
- [14] Y. Kawamata, I. Yonekawa and K. Kurihara, Proc. 19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (2002, Atlantic City, USA) p.172.
- [15] K. Kurihara, Fusion Eng. Des. **51**, 1049 (2000).
- [16] 栗原研一他：「ITER におけるプラズマ形状再構築法の新提案」第 4 回核融合エネルギー連合講演会 (大阪大学, 2002) 予稿集 p.336.
- [17] K. Kurihara, Nucl. Fusion **33**, 399 (1993).
- [18] 関谷 譲：私信 (1991).
- [19] H. Takahashi, S. Sakakibara *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 3249 (2001).
- [20] 笹島唯之他：「積層型プローブの JT-60 設置」平成 15 年度高エネルギー加速器研究機構 技術研究会報告 (KEK Proceedings 2003-16, 4-011).
- [21] T. Shikama and G.P. Pells, J. Nucl. Mater. **212-215**, 1133 (1994).
- [22] K. Noda *et al.*, Fusion Eng. Des. **29**, 448 (1995).
- [23] T. Nishitani *et al.*, Fusion Eng. Des. **42**, 443 (1998).
- [24] S. Moriyama *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, 1479 (1989).
- [25] S. Hara *et al.*, Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors 1 (Plenum Press, New York and London, 1998) p.545.
- [26] K. Kawahata *et al.*, JAERI-Tech 95-041, Japan Atomic Energy Research Institute (1995).
- [27] K. Nakamura *et al.*, Fusion Eng. Des. **66-68**, 771 (2003).
- [28] 飯尾俊二：「光ファイバーをセンサーとする電流・磁場計測」平成 14 年度九州大学応用力学研究所共同研究成果報告書 (第 6 号) p.219.



さかき ばら さとる
榊原 悟

1995 年総合研究大学院大学数物科学研究科博士課程修了, 同年より核融合科学研究所勤務。博士(工学)。主な研究分野は MHD 平衡および安定性に関する実験解析で, LHD にて研究を進めている。ヘリカル系にベータ限界は存在するか? という点が一番の興味。趣味は楽器演奏, 車(主に修理?), 自転車, 登山など。



くり はら けん いち
栗原 研一

日本原子力研究所核融合装置試験部 JT-60 第 1 試験室長。1979 年東京大学工学部原子力工学科卒業。同年日本原子力研究所入所。JT-60 の設計段階からプラズマ実時間制御システムの研究開発に従事。主な研究分野は, プラズマ平衡解析, 渦電流・電磁場数理解析, 積分器開発など。特に実験への適用やもの作りを想定した実践的なアプローチを志向。工学博士。